

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Návrh zpětnovazebních oscilátorů typu RC
RC Feedback Oscillator Design

2015

Martin Matěj

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student:

Martin Matěj

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Návrh zpětnovazebních oscilátorů typu RC
RC Feedback Oscillator Design

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte a popište základní užívaná zapojení oscilátorů typu RC.
2. Prověřte vlastnosti navržených zapojení laboratorním měřením.
3. Porovnejte oscilační kmitočet a časový průběh s teoretickými hodnotami.

Seznam doporučené odborné literatury:

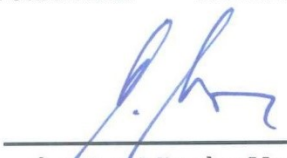
- [1] TIETZE, U; SCHENK, C. *Electronic circuits : design and applications*. Berlin : Springer, 1991. 928 s. ISBN 3-540-50608-X.
- [2] VRBA K; VRBA, K. *Technika analogových obvodů a systémů : sbírka příkladů*. Brno : VUT, 1989.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Dr. Ing. Libor Gajdošík**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2015


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 18. dubna 2015


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Dr. Ing. Liboru Gajdošíkovi za odbornou pomoc a konzultace při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o RC oscilátorech. V několika prvních částech se zabývá základním popisem a rozdělením těchto oscilátorů. Seznamuje nás s jednotlivými parametry oscilátorů a jejich podmínkami pro vznik oscilací. Práce se dále zabývá schémata zapojení základních typů RC oscilátorů. Je zde uvedeno jejich schéma zapojení, stanovení a výpočty příslušných veličin. V praktické části se dostaneme k vlastnímu zapojení základních typů RC oscilátorů pomocí programu NI Multisim. Hlavním cílem této práce je ověřit návrh z programu NI Multisim prostřednictvím konstrukcí RC oscilátorů a porovnat skutečné získané hodnoty s hodnotami vypočtenými či simulovanými.

Klíčová slova

RC oscilátor; RC článek; zpětná vazba; Wienův můstek; dvojitý T-článek; pásmová zadrž; pásmová propust; operační zesilovač

Abstract

This thesis deals with the RC oscillators. In several first parts deals with the basic description and division of these oscillators. It introduces us to the different parameters of oscillators and their conditions for the emergence of oscillations. Thesis also deals with the wiring diagrams of basic types of RC oscillators. Is mentioned here their wiring diagram, determination and calculation of the relevant variables. In the practical part we get to the actual involvement of the basic types of RC oscillators using the program NI Multisim. The main goal of this thesis is to verify the draft from the program NI Multisim through design of RC oscillators and compare the actual obtained values with the calculated or simulated values.

Key words

RC oscillator; RC circuit; feedback; Wien bridge; double T-cell; notch filter; bandpass; operational amplifier

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
U	V	napětí
I	A	proud
R	Ω	rezistor
C	F	kapacitor
f	Hz	frekvence
<i>f_v</i>	kHz	vypočtená frekvence
<i>f_s</i>	kHz	simulovaná frekvence
<i>f_o</i>	kHz	odměřená frekvence

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
OZ	operační zesilovač
XSC1, XSC2	osciloskop
OUT	výstup

Obsah

Úvod.....	- 11 -
1 Popis a rozdělení oscilátorů.....	- 12 -
1.1 Popis a vlastnosti oscilátorů	- 12 -
1.2 Rozdělení oscilátorů.....	- 12 -
1.3 Parametry oscilátorů.....	- 13 -
1.3.1 Stabilita frekvence.....	- 13 -
1.3.2 Přesnost frekvence.....	- 14 -
1.3.3 Fázový a amplitudový šum.....	- 14 -
1.4 Podmínky vzniku oscilací	- 16 -
1.4.1 Amplitudová podmínka	- 17 -
1.4.2 Fázová podmínka	- 17 -
2 RC oscilátory.....	- 18 -
2.1 Můstkové RC oscilátory.....	- 18 -
2.1.1 Wienův můstek.....	- 18 -
2.1.2 Dvojitý T-článek.....	- 19 -
2.2 RC oscilátory s posouváním fáze	- 20 -
2.2.1 Dolní propust.....	- 20 -
2.2.2 Horní propust.....	- 21 -
3 Návrh obvodů pomocí programu NI Multisim.....	- 22 -
3.1 Wienův můstek.....	- 22 -
3.2 Dvojitý T-článek	- 24 -
3.3 RC oscilátor s horní propustí.....	- 26 -
3.4 RC oscilátor s dolní propustí.....	- 27 -
4 Vlastní realizace obvodu v laboratoři.....	- 30 -
4.1 Wienův můstek.....	- 31 -
4.2 Dvojitý T-článek	- 33 -
4.3 RC oscilátor s horní propustí.....	- 35 -
4.4 RC oscilátor s dolní propustí.....	- 37 -
Závěr	- 39 -

Použitá literatura	- 40 -
Seznam příloh.....	- 41 -

Úvod

Tématem bakalářské práce je návrh zpětnovazebních oscilátorů typu RC. Tato práce se zabývá základním popisem a rozdělením oscilátorů, které vedou k základnímu pochopení jejich činnosti a nutným podmínkám vzniku oscilací, jsou zde také popsána schémata zapojení základních typů RC oscilátorů. Cílem bakalářské práce je ověřit laboratorním měřením navržených RC oscilátorů simulaci z programu a porovnat skutečné získané hodnoty s hodnotami vypočtenými i simulovanými. Pro simulace obvodů je použit program NI Multisim.

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části je uveden základní popis s vlastnostmi, parametry a rozdělením oscilátorů. Jsou zde vysvětleny podmínky vzniku oscilací a znázorněna základní zapojení RC oscilátorů s operačními zesilovači. Jsou zde popsány využité vzorce a vztahy.

Praktická část obsahuje návrh všech čtyř druhů zapojení v programu NI Multisim, kde bylo mimo jiné nutno dopočítat všechny důležité hodnoty pro nasimulování obvodů. Dále je zde zmíněna samotná realizace obvodů v laboratoři, kde jsem si nasimulované obvody prakticky zapojil a změřil. Následně jsem neměřené hodnoty porovnal s teoretickými a nasimulovanými hodnotami.

Při zpracování bakalářské práce mi byla významným pomocníkem kniha autorů Ulrich Tietze, Christoph Schenk a Eberhard Schmid, *Electronic circuits: design and applications*, spolu s anglickou webovou stránkou <http://www.electronics-tutorials.ws>. Z těchto zdrojů jsem načerpal odborné znalosti, díky nimž jsem mohl lépe uchopit dané téma včetně principu oscilátorů.

1 Popis a rozdělení oscilátorů

1.1 Popis a vlastnosti oscilátorů

Základní prvky skupiny zdrojů střídavého signálu můžeme nazývat oscilátory, patří mezi jednu z nejvýznamnějších součástí elektrotechniky. Oscilátory se chovají jako převodníky energie, nevytvářejí energii, pouze převádějí stejnosměrný proud ze zdroje na střídavý proud s požadovanou frekvencí a amplitudou. Frekvenční rozsah sahá od několika Hz po desítky GHz. Obecně lze oscilátor označit za autonomní obvod generující sinusový signál.

Hlavní předností oscilátorů je, že to jsou nerotační zařízení. V důsledku toho neexistuje žádné opotřebení, které koresponduje s delší životností, taktéž není třeba vynakládat tolik energie díky absenci pohyblivých částí. Mezi další přednosti můžeme zařadit samotnou nízkou cenu oscilátorů, jejich malou velikost a široké možnosti nastavení právě pro danou sféru použití. Proto jsou tak hojně využívány, oscilátory je výhodné použít například jako rádio vysílače a přijímače, radar, můžeme je také nalézt v mikropočítačích či osciloskopech a dalších zařízeních [1].

Skladba oscilátorů je vcelku jednoduchá, hlavní částí je zesilovač s vhodně vytvořenou zpětnou vazbou, dále pak řídicí obvod, který je složen z RC nebo LC prvku. Konceptem oscilátorů je přivedení zpětné vazby signálu do místa vstupního signálu. Abychom docílili generování výstupního signálu, potřebujeme, aby zesílení smyčky a fáze byly správné. Obvod se zpětnou vazbou udává, na jaké frekvenci bude oscilátor generovat signál. Oscilátory ovšem mohou generovat jak pevnou tak i proměnnou frekvenci [2][1].

1.2 Rozdělení oscilátorů

Oscilátory dělíme podle tvaru časového průběhu generovaných kmitů na:

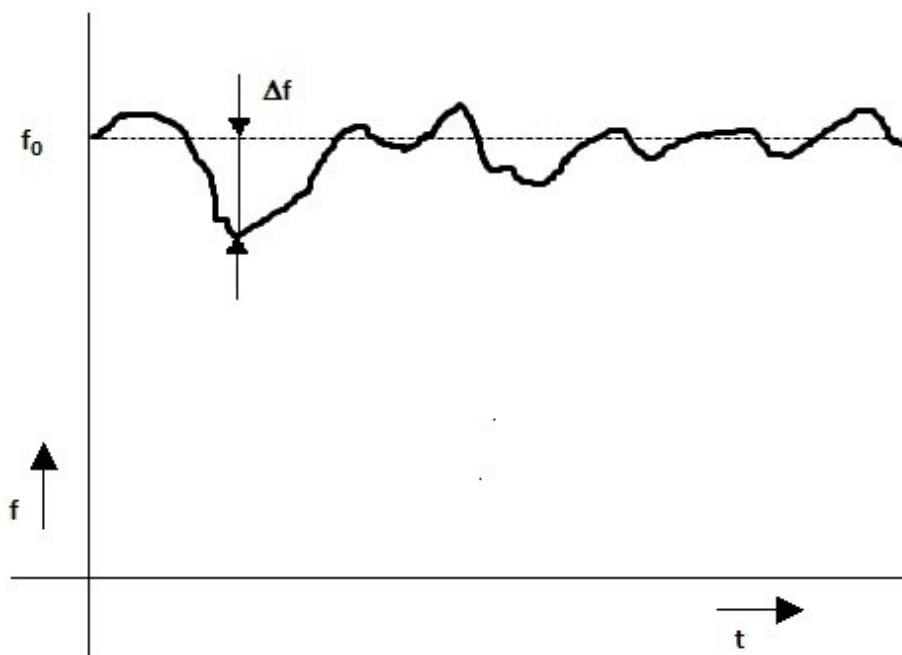
- Harmonické – vytvářejí výstupní napětí, které má tvar sinusového průběhu se stálou frekvencí. Dále oscilátory můžeme rozčlenit podle druhu na:
 - LC oscilátory – nejpoužívanější oscilátory, které mají nejméně zkreslený tvar generovaného signálu. Skládají se z rezonančního obvodu, ten tvoří cívka, kondenzátor a zesilovací člen.
 - RC oscilátory.
 - Krystalové oscilátory – základem těchto oscilátorů jsou krystalické látky. Krystalové oscilátory jsou vhodné zejména tehdy, pokud požadujeme stabilní frekvenci.
- Neharmonické – vytvářejí výstupní napětí tvarově nesinusového průběhu, ovšem podmínky vzniku oscilací musí být splněny. Mezi takovéto průběhy patří například obdélníkové, pilové, pravoúhlé či jiné kmity [2].

1.3 Parametry oscilátorů

1.3.1 Stabilita frekvence

Stabilita oscilační frekvence nemůže být udržována po celou dobu běhu obvodu (proto se setkáváme s pojmem stabilita frekvence). Stabilita frekvence je definována jako míra změny frekvence v porovnání s časem. Číselně lze vyjádřit největší změnou frekvence Δf ve srovnání k jmenovité hodnotě f_0 za určitý časový interval Δt , kupříkladu za 1 sekundu, 1 hodinu či 1 den atd. Tyto odchylky způsobuje kolísání hodnot obvodových prvků, které určují frekvenci oscilátoru, můžeme mezi ně zařadit například kolísání napájecího napětí, zatížení výstupu, vliv teploty na změnu hodnot odporů, kondenzátorů a další.

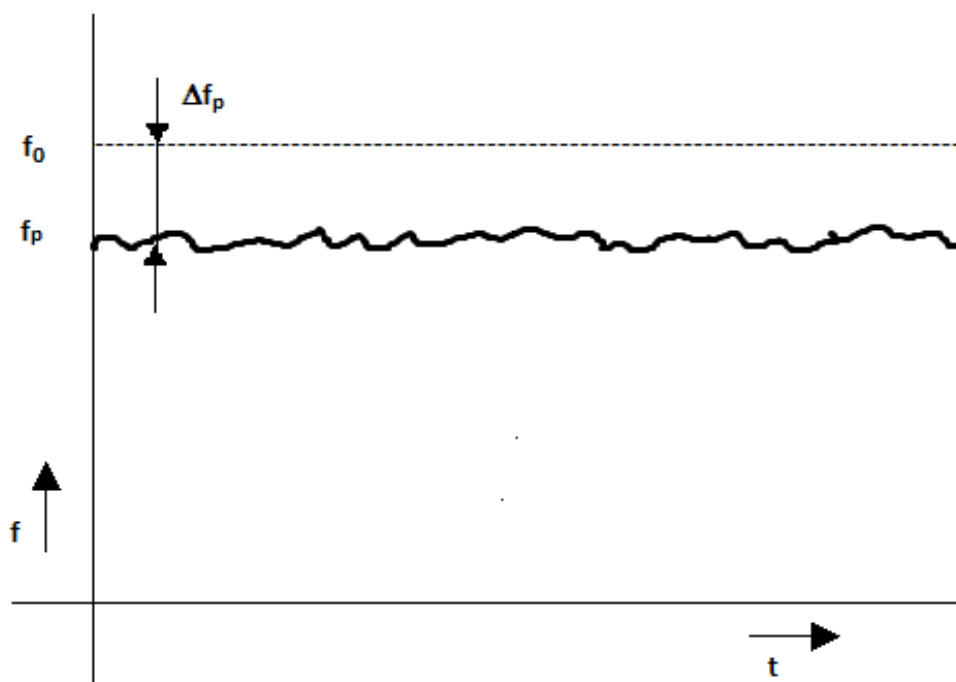
Z hlediska časového intervalu můžeme stabilitu rozdělit na krátkodobou a dlouhodobou. Krátkodobá stabilita, kde Δt je menší než 1 sekunda, je odchylka frekvence způsobená nejčastěji šumem. Dlouhodobá stabilita je odchylka frekvence zaznamenaná v delším časovém období, Δt je větší než 1 sekunda. Tuto odchylku zapříčiňuje zejména vliv okolního prostředí. Pro výpočet stability frekvence nastavíme oscilátor na jmenovitou frekvenci f_0 a po určitý časový úsek zaznamenáváme generovanou frekvenci. Celý průběh můžeme vidět na obrázku 1.1. Ze zaznamenaných hodnot zjistíme frekvenci Δf a vypočítáme.



Obrázek 1.1: *Stabilita frekvence [3]*

1.3.2 Přesnost frekvence

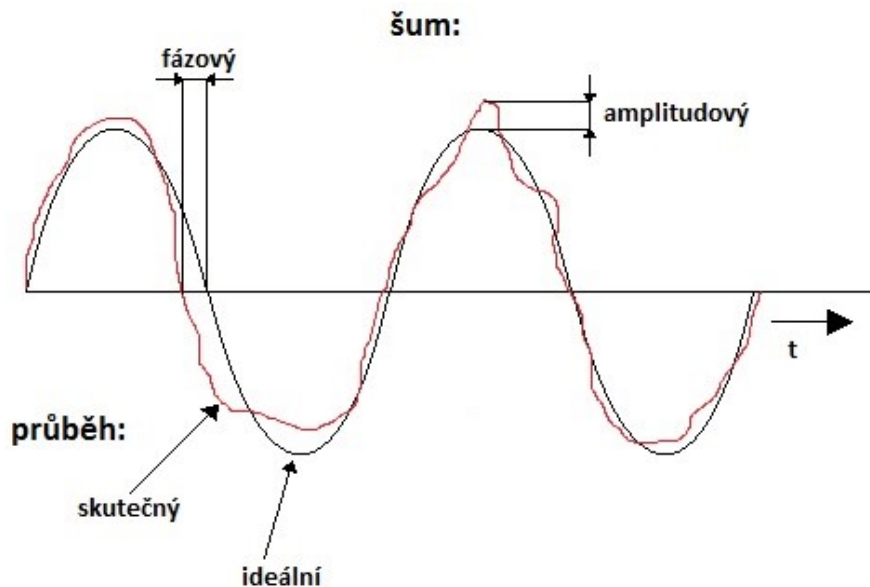
Přesnost frekvence je definována jako poměrná odchylka $\Delta f_p/f_0$, opět v porovnání s časem Δt . Vyjádření veličiny Δf_p získáme zprůměrováním získaných hodnot f_p . Přesnost je nepřímo úměrná systematickým či náhodným chybám, s rostoucími chybami klesá přesnost. Z obrázku 1.2 je patrné, že generovaná frekvence f_p je nepřesná.



Obrázek 1.2: Přesnost frekvence [3]

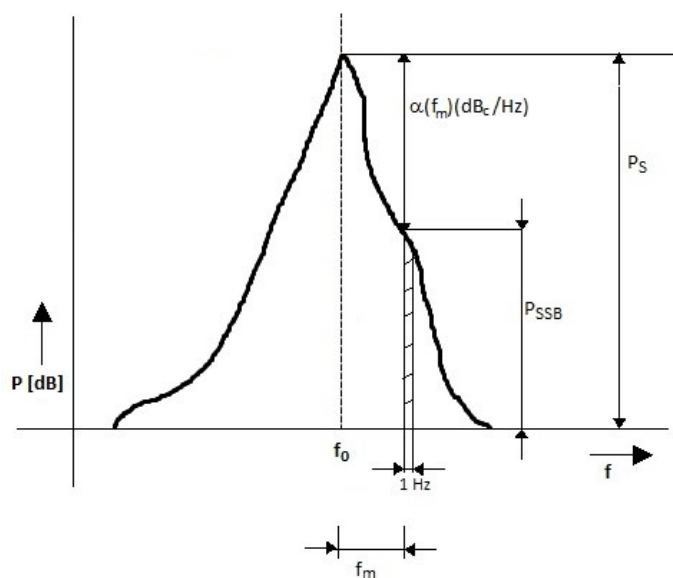
1.3.3 Fázový a amplitudový šum

Jedním z hlavních parametrů oscilátorů je šum, i sebemenší šum v oscilátorech vede ke skokovým změnám frekvenčního spektra. Fázový šum je náhodná fluktuace fáze oscilátoru, kdežto amplitudový šum je náhodná fluktuace amplitudy oscilátoru. Oba jsou měřeny na určitém krátkém časovém úseku. Obrázek 1.3 reprezentuje znázornění dvou průběhů signálu v čase t , kde mimo ideálního průběhu sinusového signálu můžeme vidět průběh reálný z výstupu oscilátoru. Je zřejmé, že skutečný průběh se od ideálního nepatrně liší, právě rozdíly těchto průběhů označujeme jako amplitudový šum, kde si všimneme změny velikosti signálu, a fázový šum, kde dochází k posunu průchodu signálu nulou.



Obrázek 1.3: Amplitudový a fázový šum

U většiny oscilátorů je amplitudový šum zanedbatelný. Vysoká úroveň fázového šumu může nepříznivě ovlivnit šumové číslo analogových systémů, či u digitálních systémů zvýšit chybovost. Nejjednodušší zjištění fázového šumu je zobrazení frekvenčního spektra signálu spektrálním analyzátozem. Typické spektrum výstupního signálu oscilátoru je znázorněno na obrázku 1.4.



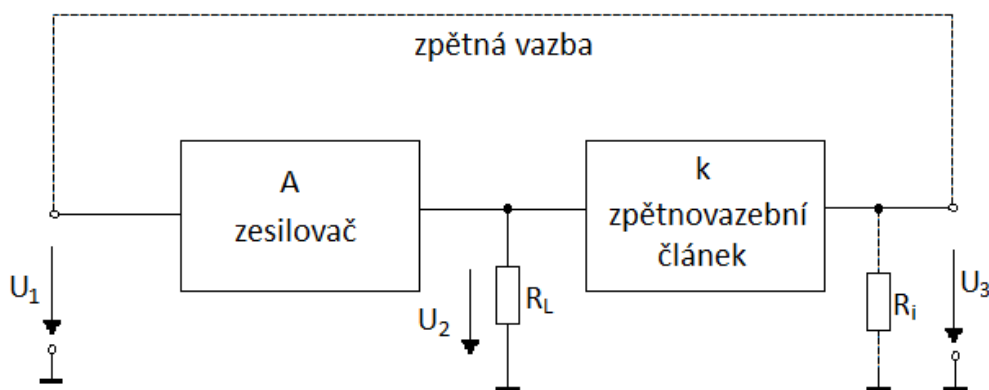
Obrázek 1.4: Spektrum fázového šumu

Spektrum signálu je symetrické k jmenovité hodnotě frekvence f_0 , stačí proto použít jedno postranní pásmo (SSB). Fázový šum se měří na frekvenci, která je označována jako ofsetová frekvence f_m , a je definován vztahem:

$$\alpha(f_m) = \frac{P_{SSB}}{P_S} [\text{Hz}^{-1}], \text{nebo } \alpha_{dB}(f_m) = 10 \log \frac{P_{SSB}}{P_S} [\text{dBc} \cdot \text{Hz}^{-1}]. \quad (1.1)$$

Symbolem P_{SSB} se značí šumový výkon působící uvnitř frekvenčního intervalu o šířce 1 Hz ve vzdálenosti f_m od nosné vlny, P_S je celkový výkon nosné vlny [3].

1.4 Podmínky vzniku oscilací



Obrázek 1.5: *Princip oscilátoru*

Základní princip oscilátoru je zobrazen na obrázku 1.5, kde operační zesilovač násobí vstupní napětí ziskem A , tím vzniká mezi U_1 a U_2 parazitní fázový posun α . K výstupu zesilovače je připojen zátěžový odpor R_L a frekvenčně závislý zpětnovazební článek s napěťovým zesílením k , zpětná vazba je dána vztahem:

$$U_3 = k \cdot U_2, \quad (1.2)$$

kde mezi U_2 a U_3 je fázový posun označovaný jako β .

Pro vznik oscilací je nutné zavést zpětnou vazbu. Rezistor R_i reprezentuje vstupní odpor operačního zesilovače. Aby obvod oscilloval, musí být výstupní napětí U_3 stejné jako vstupní napětí U_1 , z toho plyne podmínka:

$$U_1 = U_3 = k \cdot A \cdot U_1. \quad (1.3)$$

Z rovnice 1.3 získáme komplexní rovnici 1.4, která v sobě zahrnuje dvě dílčí podmínky oscilací:

$$k \cdot A = 1 [4]. \quad (1.4)$$

1.4.1 Amplitudová podmínka

Odvozením rovnice 1.4 plyne zesílení g zpětnovazební smyčky, které nám dává amplitudovou podmínku:

$$g = |k \cdot A| = 1. \quad (1.5)$$

Oscilátor může kmitat pouze tehdy, jestliže pokles zesílení vyrovnává zpětnovazební členek. Pokud je zesílení menší než 1, velikost kmitů oscilátoru exponenciálně klesá, až dojde k úplnému ustání oscilací. V případě, že zesílení je větší než 1, hodnota kmitů oscilátoru exponenciálně roste [4].

1.4.2 Fázová podmínka

$$\alpha + \beta = 0, 2\pi \dots \quad (1.6)$$

Fázová podmínka v rovnici 1.6 uvádí, že fázový posun mezi zesilovačem a zpětnovazebním článkem musí být roven 0° nebo 360° . Kmitání může nastat pouze tehdy, je-li výstupní napětí ve fázi se vstupním napětím [4].

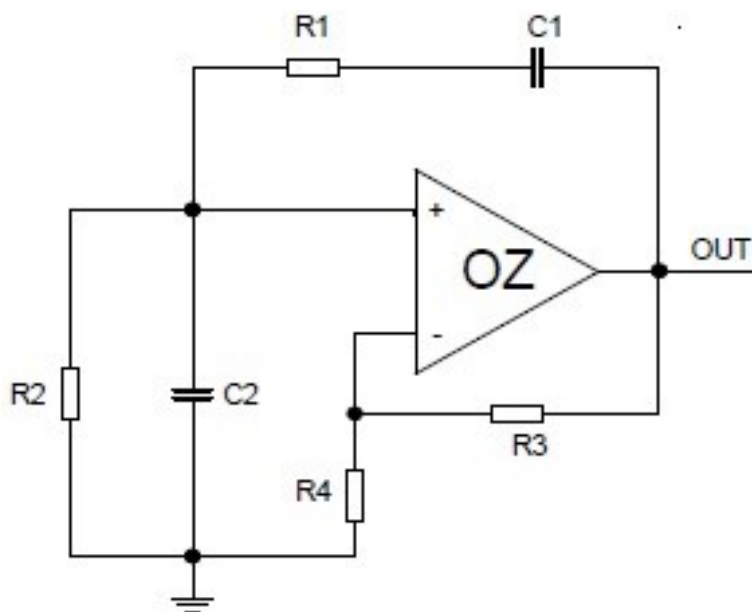
2 RC oscilátory

RC oscilátory jsou tvořené z rezistorů a kondenzátorů, tudíž jsou vhodné k použití pro velmi nízké frekvence, kde není výhodné použít oscilátory s LC obvodem. Navíc jsou snadno přeladitelné. Tyto oscilátory musí splňovat amplitudovou a fázovou podmínku pro vznik oscilací. [2]

2.1 Můstkové RC oscilátory

2.1.1 Wienův můstek

Oscilátory s Wienovým můstkem jsou typickou ukázkou použití pásmové propusti.



Obrázek 2.1: Schéma zapojení Wienův můstek

Základní zapojení oscilátoru RC s Wienovým článkem, zobrazeno na obrázku 2.1, je složeno z operačního zesilovače, Wienova můstku, jež tvoří kladnou zpětnovazební větev, a odporů, nastavujících zesílení zesilovače, záporné zpětnovazební větve.

Wienův můstek se skládá z RC článků druhého řádu, paralelně připojeného článku $R_1 C_1$, tvořícího horní propust, spojeného s dolní propustí článku $R_2 C_2$, produkující pásmovou propust jen o jedné frekvenci a nulovém fázovém posunu při zvolené frekvenci f_0 .

Při zvolené rezonanční frekvenci f_0 bude napětí zavedené na invertující a neinvertující vstupy rovno, neboli ve fázi. Kladná zpětná vazba bude rušit zápornou zpětnou vazbu, což zapříčiní kmitání.

Platí, že:

$$R_1 = R_2 = R, \quad (2.1)$$

$$C1 = C2 = C. \quad (2.2)$$

Fázová podmínka vzniku oscilací je splněna na frekvenci:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot RC}. \quad (2.3)$$

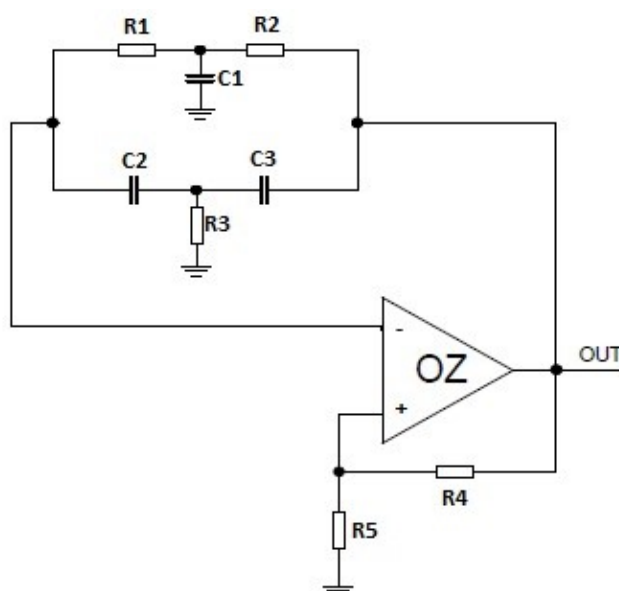
Napěťový zisk zesilovače A_V musí být stejný nebo větší než 3, aby obvod začal oscilovat, jelikož velikost výstupního napětí je rovna 1/3 vstupního napětí. Hodnota A_V je dána poměrem odporů R_3 a R_4 .

Amplitudová podmínka je splněna při zesílení:

$$A_V = 1 + \left(\frac{R3}{R4}\right) \geq 3 \quad [6][7][9]. \quad (2.4)$$

2.1.2 Dvojitý T-článek

Oscilátor s dvojitým T-článkem tvoří typické použití pásmové zadržky.



Obrázek 2.2: Schéma zapojení dvojitého T-čláčku

Základní zapojení oscilátoru RC s dvojitým T-článkem, zobrazeno na obrázku 2.2, je složeno z operačního zesilovače, dvojitého T-čláčku a odporů R_4 a R_5 .

Do operačního zesilovače je na invertující vstup přiveden dvojitý T-článek složený z RC článku třetího řádu. Horní propust tvoří kondenzátory C_2 , C_3 a odpor R_3 , dolní propust tvoří odpory R_1 , R_2 a kondenzátor C_1 , jakožto dva paralelně připojené T-čláčky, proto dvojitý T-článek. Na neinvertující vstup je připojen odpor R_4 , který společně s odporem R_5 tvoří zesílení A_V .

Kladná zpětná vazba je zavedena pro všechny frekvence, záporná zpětná vazba ruší kladnou zpětnou vazbu pro všechny frekvence kromě rezonanční frekvence f_0 .

Platí, že:

$$R1 = R2 = R, \quad (2.4)$$

$$C2 = C3 = C, \quad (2.5)$$

$$C1 = 2 \cdot C, \quad (2.6)$$

$$R3 = \frac{R}{2}. \quad (2.7)$$

Fázová podmínka vzniku oscilací je tedy splněna na frekvenci:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot RC}. \quad (2.8)$$

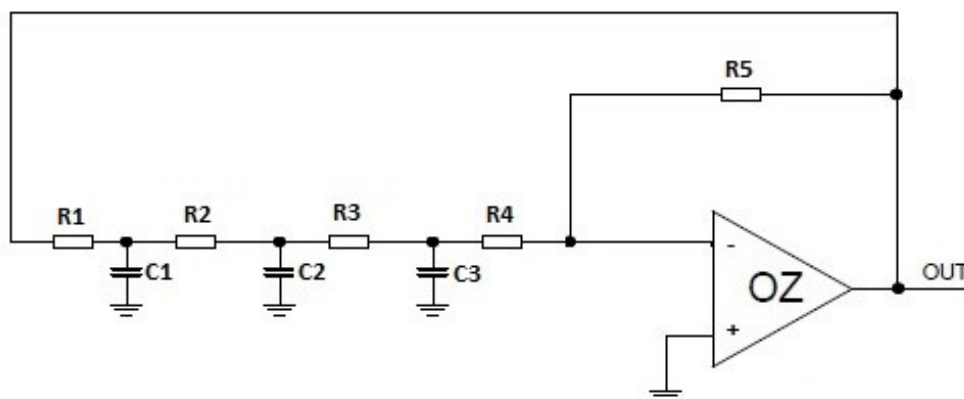
Napěťový zisk zesilovače A_V musí být opět stejný nebo větší než 3.

Amplitudová podmínka je splněna při zesílení:

$$A_V = 1 + \left(\frac{R4}{R5}\right) \geq 3 \text{ [8][5]}. \quad (2.9)$$

2.2 RC oscilátory s posouvanou fází

2.2.1 Dolní propust



Obrázek 2.3: Schéma zapojení dolní propusti

Na obrázku 2.3 je zobrazeno základní zapojení RC oscilátoru s dolní propustí. Operační zesilovač je v invertujícím zapojení a posouvá fázi o 180° . Zápornou zpětnou vazbu tvoří RC články dolní propusti, kde každý RC člen posouvá fázi o dalších 60° . Tím je splněna fázová podmínka ($180^\circ + 3 \cdot 60^\circ = 360^\circ$) při frekvenci f_0 [5].

Platí, že:

$$R1 = R2 = R3 = R4 = R, \quad (2.10)$$

$$C1 = C2 = C3 = C. \quad (2.11)$$

Fázová podmínka vzniku oscilací je splněna na frekvenci:

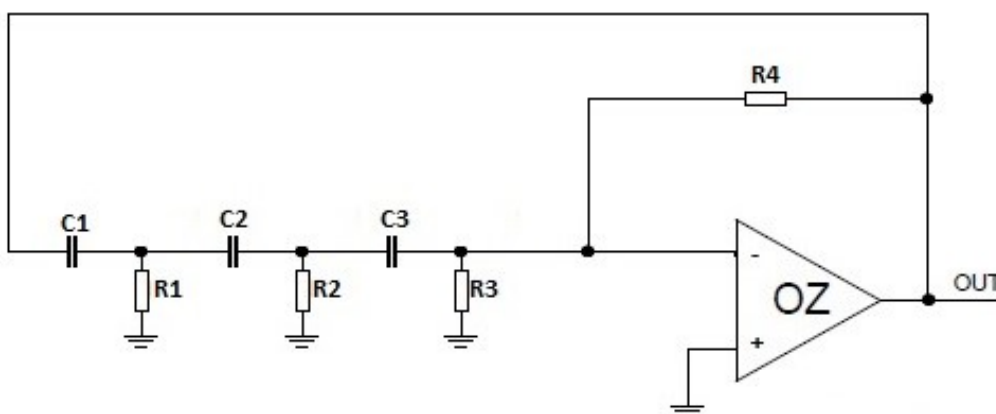
$$f_0 = \frac{\sqrt{10}}{2 \cdot \pi \cdot RC} \quad (2.12)$$

Napěťový zisk zesilovače A_V musí být stejný nebo větší než 56.

Amplitudová podmínka je splněna při zesílení:

$$A_V = \left(\frac{R5}{R}\right) \geq 56 [10]. \quad (2.13)$$

2.2.2 Horní propust



Obrázek 2.4: Schéma zapojení horní propusti

Na obrázku 2.4 je zobrazeno základní zapojení RC oscilátoru s horní propustí. Stejně jako tomu bylo v případě zapojení s dolní propustí, je operační zesilovač v invertujícím zapojení a posouvá fázi o 180° . Zápornou zpětnou vazbu tvoří RC články horní propusti, kde každý RC člen posouvá fázi o dalších 60° . Tím je splněna fázová podmínka ($180^\circ + 3 \cdot 60^\circ = 360^\circ$) při frekvenci f_0 .

Platí, že:

$$R1 = R2 = R3 = R, \quad (2.14)$$

$$C1 = C2 = C3 = C. \quad (2.15)$$

Fázová podmínka vzniku oscilací je splněna na frekvenci:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot RC \cdot \sqrt{6}} \quad (2.16)$$

Napěťový zisk zesilovače A_V musí být stejný nebo větší než 29.

Amplitudová podmínka je splněna při zesílení:

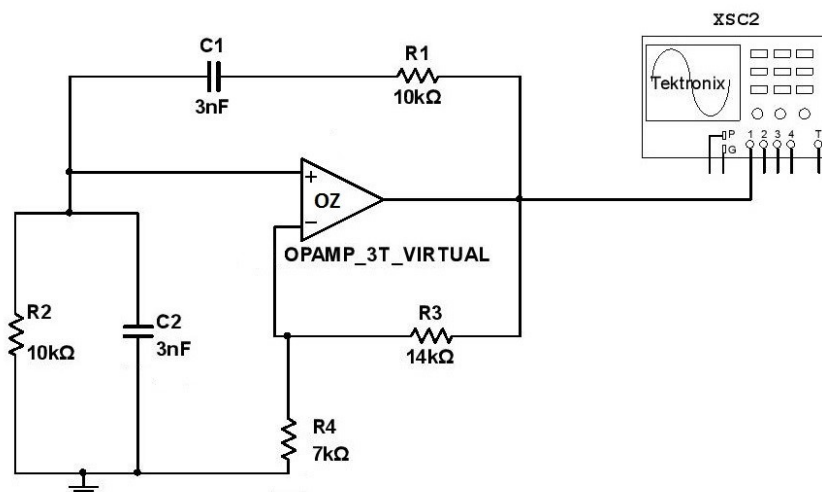
$$A_V = \left(\frac{R4}{R}\right) \geq 29 [5][11]. \quad (2.17)$$

3 Návrh obvodů pomocí programu NI Multisim

Návrh obvodů byl proveden na základě obecně známých schémat zapojení a vzorců. Celý návrh byl zkonstruován a následně prověřen v programu NI Multisim. Výstupem z programu je graf zobrazující sinusový průběh generované frekvence. Ve všech obvodech jsem se snažil v co nejvyšší možné míře napodobit součástky a přístroje používané v laboratoři VŠB. Jako operační zesilovač byl použit OPAMP_3T_VIRTUAL z nabídky v programu, jeho parametry se blíží ideálním hodnotám. Je napájen pozitivním a negativním napětím 15V. Jako osciloskop byl použit Tektronix TDS 2024, který byl vybrán, jelikož je nejpodobnější osciloskopu použitým při reálném měření.

3.1 Wienův můstek

Pro sestavení obvodu bude nejprve potřeba vypočítat hodnoty odporů a kondenzátorů. Dále pak musíme splnit podmínky vzniku oscilací. Na obrázku 3.1 je znázorněno schéma zapojení RC oscilátoru s Wienovým můstkem. Na zesilovači je na invertujícím vstupu připojen odpor R3 a R4. Poměr těchto odporů nám dává zesílení napětí na výstupu operačního zesilovače, na neinvertující vstup je připojen Wienův můstek.



Obrázek 3.1: Schéma zapojení

Jako výstupní proud operačního zesilovače jsem zvolil 1 mA. Vzhledem k tomu, že jsem si určil výstupní proud operačního zesilovače, bylo nutné vypočítat jakou velikost odporu R3 použít (rovnice 3.1), abych tohoto proudu docílil:

$$R3 = \frac{U_{sat}}{I} = \frac{14}{1 \cdot 10^{-3}} = 14 \text{ k}\Omega. \quad (3.1)$$

Vycházel jsem z předpokladu, že u většiny operačních zesilovačů je saturační napětí U_{sat} výstupu minimálně o jeden volt nižší než napětí napájecí:

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \left(\frac{R_3}{R_4}\right) \geq 3. \quad (3.2)$$

Zesílení napětí A_V operačního zesilovače musí být větší nebo rovno 3. Aby byla tato podmínka splněna, je nutné dopočítat odpor R_4 . Zesílení napětí A_V určíme 3. Z předchozí rovnice 3.2 vyjádříme R_4 :

$$R_4 = \frac{R_3}{(A_V - 1)} = \frac{14 \cdot 10^3}{(3 - 1)} = \frac{14 \cdot 10^3}{2} = 7 \cdot 10^3 \Omega \equiv 7 \text{ k}\Omega. \quad (3.3)$$

Nyní již známe hodnoty odporů R_3 a R_4 potřebné ke správnému zesílení. Hodnoty odporů R_1 , R_2 a kondenzátorů C_1 a C_2 potřebné ke konečnému sestavení obvodu určíme jako:

$$R_1 = R_2 = R = 10 \text{ k}\Omega, \quad (3.4)$$

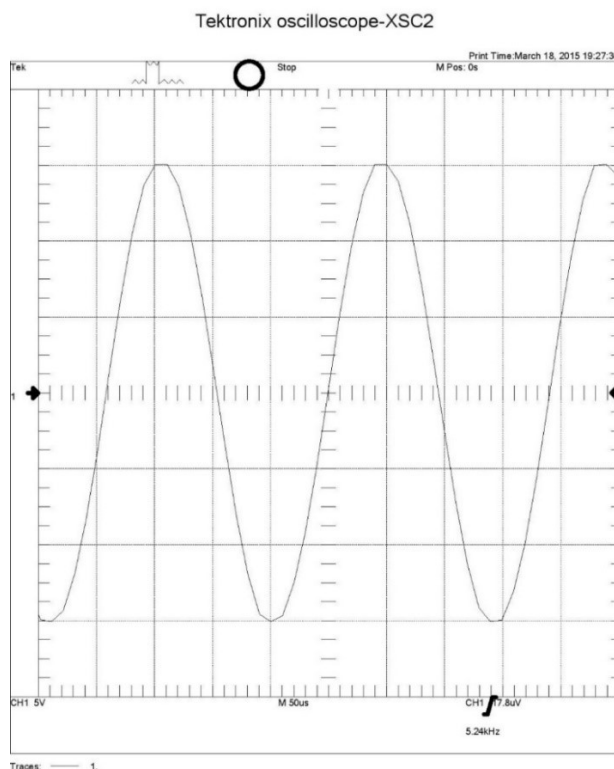
$$C_1 = C_2 = C = 3 \text{ nF}, \quad (3.5)$$

kde hodnoty odporů i kondenzátorů byly dosazeny tak, aby výpočet rezonanční frekvence bylo možno předem lépe odhadnout. Zapojení v laboratoři tak bylo snáze uskutečnitelné.

Rezonanční frekvence oscilátoru f_0 je dána vztahem:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (10 \cdot 10^3) \cdot (3 \cdot 10^{-9})} = 5\,305,17 \text{ Hz} \approx 5,31 \text{ kHz}. \quad (3.6)$$

Simulace je znázorněna na obrázku 3.2, který je zachycen na výstupu obvodu.

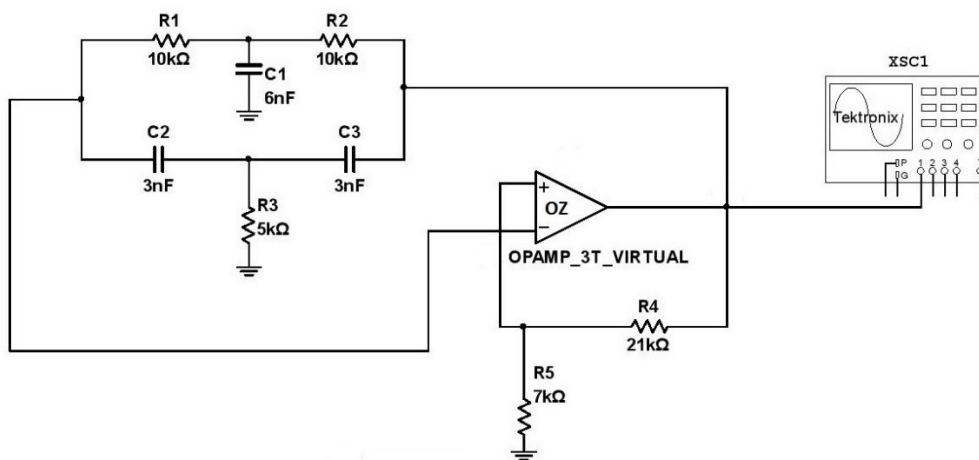


Obrázek 3.2: Zobrazení průběhu signálu na výstupu oscilátoru

Na obrázku 3.2 si můžeme všimnout sinusového průběhu signálu o frekvenci 5,24kHz, který dokazuje rozkmitání signálu. V porovnání s výsledkem rovnice 3.6 se simulovaná a vypočtená frekvence nepatrně liší v řádu desítek Hz, což může být způsobeno použitým operačním zesilovačem.

3.2 Dvojitý T-článek

Na obrázku 3.3 je znázorněno schéma zapojení RC oscilátoru s dvojitým T-článkem. Zesilovač je v invertujícím zapojení. Na neinvertující vstup je připojen odpor R4 a R5. Poměr těchto odporů nám dává zesílení napětí na výstupu operačního zesilovače. Na invertující vstup je připojen dvojitý T-článek, který zajišťuje zápornou zpětnou vazbu obvodu.



Obrázek 3.3: Schéma zapojení

Znovu jsem jako výstupní proud operačního zesilovače zvolil 1mA. Výpočet odporu R4 vzhledem ke zvolenému výstupnímu proudu vypadá takto:

$$R4 = \frac{U_{sat}}{I} = \frac{14}{1 \cdot 10^{-3}} = 14 \text{ k}\Omega. \quad (3.6)$$

Předpoklad, že saturační napětí U_{sat} výstupu je minimálně o jeden volt nižší než napětí napájecí, zůstává v platnosti.

Následuje podmínka pro zesílení napětí A_V (rovnice 3.7) operačního zesilovače, z níž později vypočítáme odpor R5:

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \left(\frac{R4}{R5} \right) \geq 3. \quad (3.7)$$

Zesílení napětí A_V určíme 3. Z předchozí rovnice 3.7 vyjádříme R5:

$$R5 = \frac{R4}{(A_V - 1)} = \frac{14 \cdot 10^3}{(3 - 1)} = \frac{14 \cdot 10^3}{2} = 7 \cdot 10^3 \Omega \equiv 7 \text{ k}\Omega. \quad (3.8)$$

Nyní můžeme začít vypočítávat hodnoty komponent dvojitého T-článku v oscilátoru:

$$R1 = R2 = R = 10 \text{ k}\Omega, \quad (3.9)$$

$$C2 = C3 = C = 3 \text{ nF}. \quad (3.10)$$

V rovnicích 3.9 a 3.10 jsem dosadil hodnoty odporů a kondenzátorů. Dle základního principu dvojitého T-čláku se kondenzátor C1 vypočítává vztahem:

$$C1 = 2 \cdot C = 2 \cdot 3 \cdot 10^{-9} = 6 \cdot 10^{-9} \text{ F} \equiv 6 \text{ nF}. \quad (3.11)$$

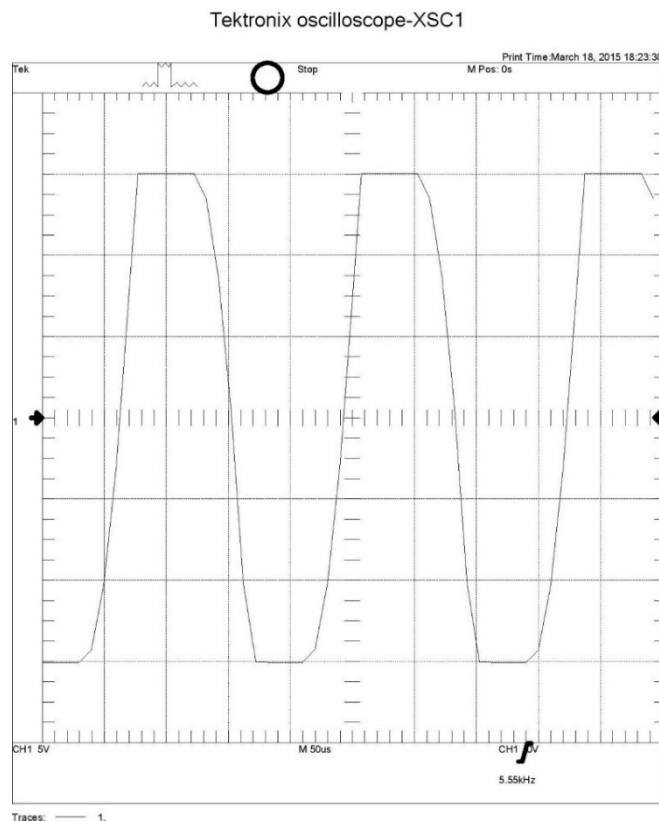
Výpočet odporu R3 je dán rovnicí 3.12:

$$R3 = \frac{R}{2} = \frac{10 \cdot 10^3}{2} = 5 \cdot 10^3 \Omega \equiv 5 \text{ k}\Omega. \quad (3.12)$$

Rezonanční frekvence oscilátoru f_0 je dána vztahem:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (10 \cdot 10^3) \cdot (3 \cdot 10^{-9})} = 5305,17 \text{ Hz} \approx 5,31 \text{ kHz}. \quad (3.13)$$

Simulace je znázorněna na obrázku 3.4, kde je zachycen sinusový průběh signálu o frekvenci 5,55 kHz na výstupu obvodu.

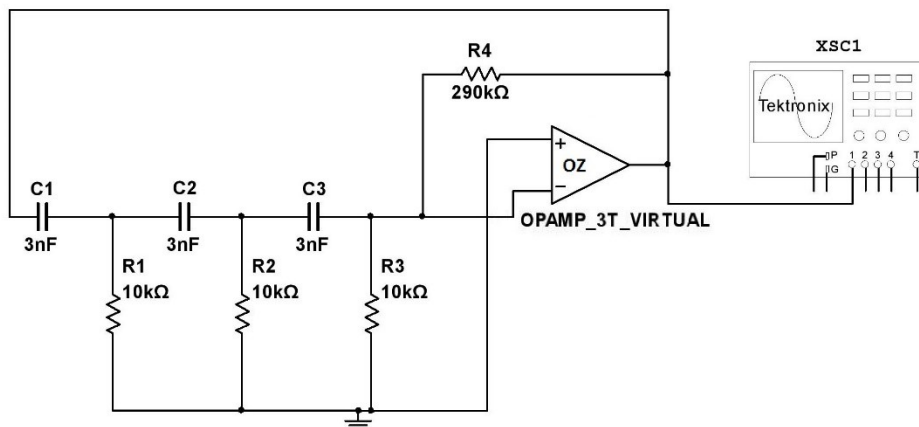


Obrázek 3.4: Zobrazení průběhu signálu na výstupu oscilátoru

Porovnáním vypočtené frekvence, z rovnice 3.13, a nasimulované frekvence, z obrázku 3.4, lze rozpoznat rozdíl frekvencí v řádu stovek Hz. Tato odchylka může být opět způsobena použitým operačním zesilovačem.

3.3 RC oscilátor s horní propustí

V tomto případě je na obrázku 3.5 znázorněno schéma zapojení RC oscilátoru s horní propustí. Zesilovač je v invertujícím zapojení. Na invertující vstup je připojen RC člen 3. řádu jako horní propust, který tvoří zápornou zpětnou vazbu obvodu, kladný vstup operačního zesilovače je uzemněn. Velikost zesílení je dána poměrem odporu R4 ke vstupnímu odporu operačního zesilovače.



Obrázek 3.5: Schéma zapojení

Pro všechny odpory (rovnice 3.14) i kondenzátory (rovnice 3.15) ve zpětnovazební smyčce jsem zvolil stejné hodnoty:

$$R1 = R2 = R3 = R = 10 \text{ k}\Omega, \quad (3.14)$$

$$C1 = C2 = C3 = C = 3 \text{ nF}. \quad (3.15)$$

Nyní již můžeme dosadit do rovnice vstupní odpor zesilovače R. Víme-li, že zesílení A_V operačního zesilovače musí být rovno nebo větší než 29, tak zesílení A_V určíme 29 (rovnice 3.16), a dopočítám odpor R4 (rovnice 3.17):

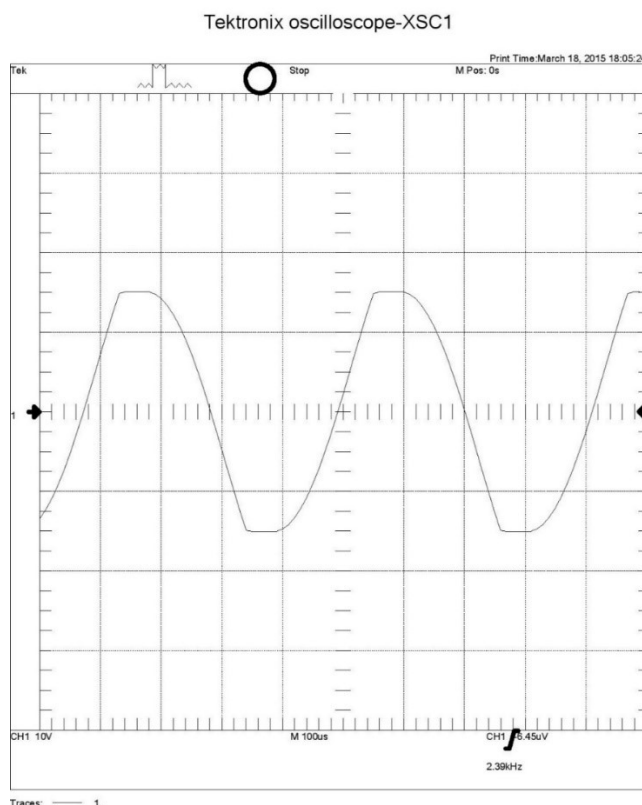
$$A_V = \frac{R4}{R} = 29, \quad (3.16)$$

$$R4 = 29 \cdot R = 29 \cdot 10 \cdot 10^3 = 290 \cdot 10^3 \Omega \equiv 290 \text{ k}\Omega. \quad (3.17)$$

Rezonanční frekvence oscilátoru f_0 je dána vztahem:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C \cdot \sqrt{6}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (10 \cdot 10^3) \cdot (3 \cdot 10^{-9}) \cdot \sqrt{6}} = 2165,83 \text{ Hz} \approx 2,17 \text{ kHz}. \quad (3.18)$$

Na obrázku 3.6 je vyobrazen výstup ze simulace obvodu, který zachycuje sinusový průběh signálu o frekvenci 2,39 kHz.

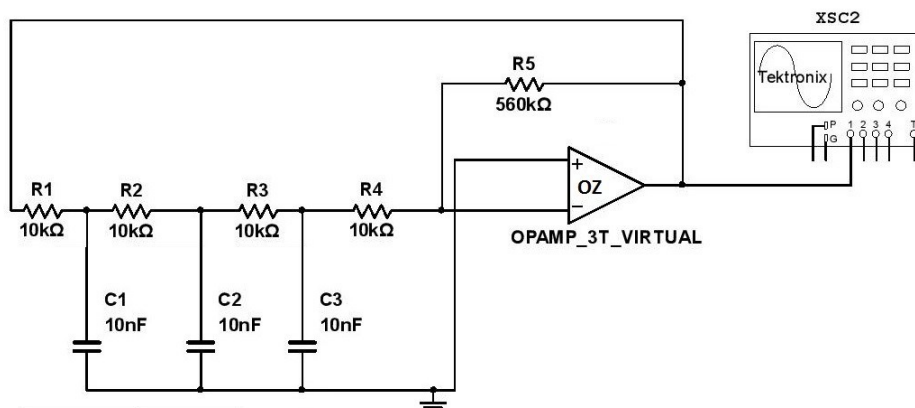


Obrázek 3.6: Zobrazení průběhu signálu na výstupu oscilátoru

Porovnáním vypočtené frekvence, z rovnice 3.18, a nasimulované frekvence, z obrázku 3.6, lze rozpoznat rozdíl frekvencí v řádu stovek Hz. Tato odchylka může být způsobena použitým operačním zesilovačem.

3.4 RC oscilátor s dolní propustí

Podobně jako u RC oscilátoru s horní propustí, i tento RC oscilátor s dolní propustí, který je zobrazen na obrázku 3.7, využívá RC článek 3. řádu, ovšem v zapojení jako dolní propust. Aby bylo možné oscilátor takto sestavit, bylo nutné přidat za RC článek zpětné vazby další odpor R4, abychom mohli regulovat zesílení operačního zesilovače a rozkmitali výstupní signál. Zesilovač je opět v invertujícím zapojení. Velikost zesílení regulujeme poměrem odporu R5 k vstupnímu odporu operačního zesilovače.



Obrázek 3.7: Schéma zapojení

Pro všechny odpory (rovnice 3.19) i kondenzátory (rovnice 3.20), které jsou součástí zpětnovazebního bloku, jsem si opět zvolil stejné hodnoty:

$$R1 = R2 = R3 = R4 = R = 10 \text{ k}\Omega, \quad (3.19)$$

$$C1 = C2 = C3 = C = 10 \text{ nF}. \quad (3.20)$$

Zesílení A_V operačního zesilovače musí být nyní rovno nebo větší než 56. Je dáno vstupním odporem R a odporem $R5$ (rovnice 3.21):

$$A_V = \frac{R5}{R} = 56. \quad (3.21)$$

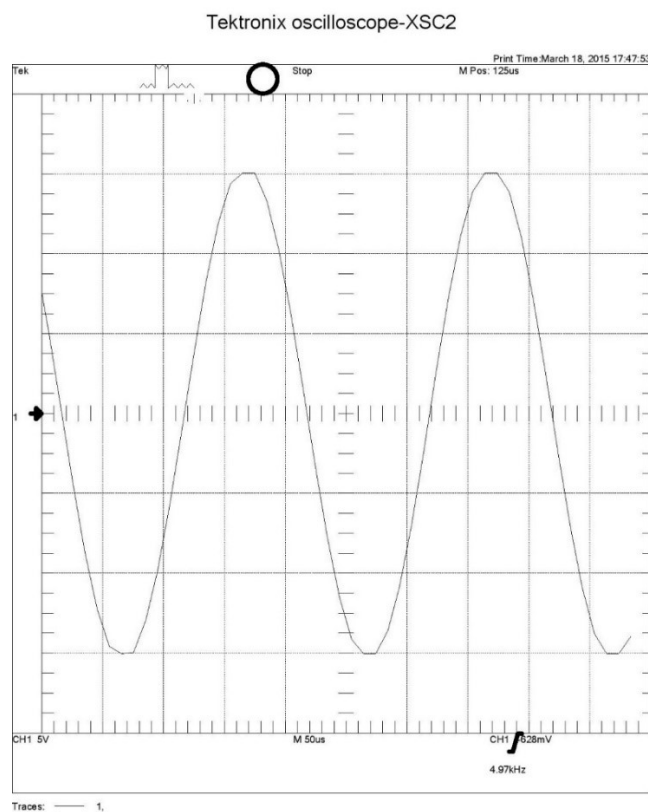
Rovnicí 3.22 vypočítáme odpor $R5$:

$$R5 = 56 \cdot R = 56 \cdot 10 \cdot 10^3 = 560 \cdot 10^3 \Omega \equiv 560 \text{ k}\Omega. \quad (3.22)$$

Nyní již pokračujeme výpočtem rezonanční frekvence oscilátoru f_0 , který je určen rovnicí:

$$f_0 = \frac{\sqrt{10}}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{\sqrt{10}}{2 \cdot \pi \cdot (10 \cdot 10^3) \cdot (10 \cdot 10^{-9})} = 5032,9 \text{ Hz} \approx 5 \text{ kHz}. \quad (3.23)$$

Na obrázku 3.8 je vyobrazen výstup ze simulace obvodu, jež zachycuje sinusový průběh signálu o frekvenci 4,97 kHz.



Obrázek 3.8: Zobrazení průběhu signálu na výstupu oscilátoru

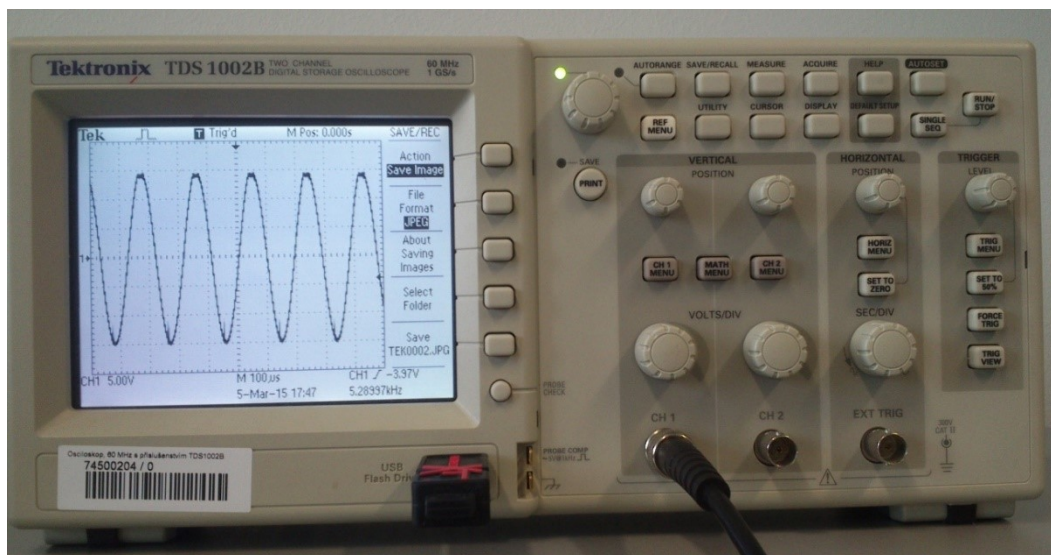
Porovnáním vypočtené frekvence, z rovnice 3.23, a nasimulované frekvence, z obrázku 3.8, lze rozpoznat rozdíl frekvencí v řádu desítek Hz. Tato odchylka může být opět způsobena použitým operačním zesilovačem.

4 Vlastní realizace obvodu v laboratoři

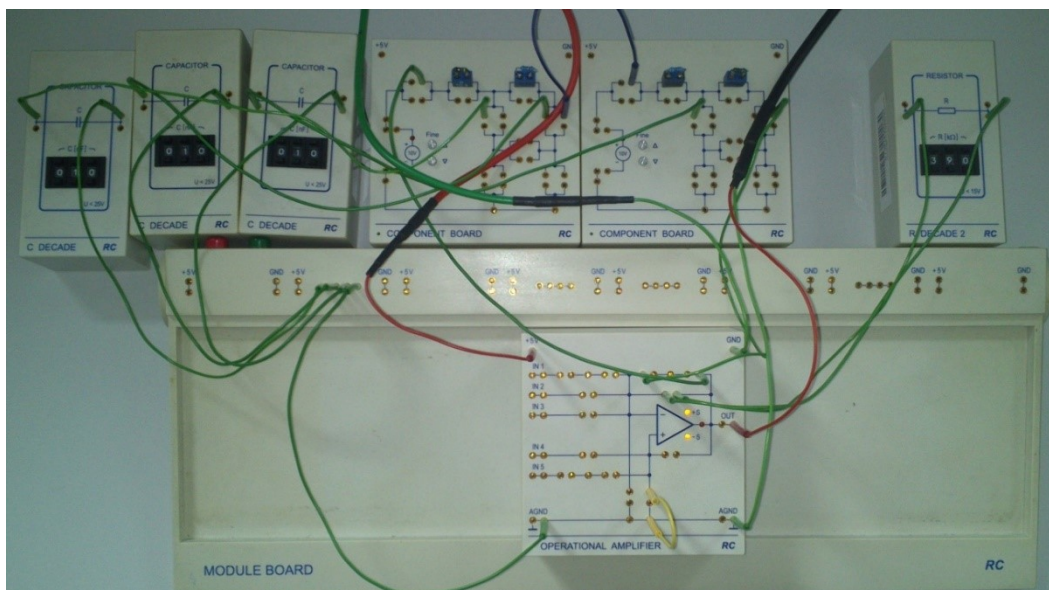
Měření bylo provedeno v laboratoři mikropočítačové techniky EB212 v budově FEI VŠB, kde byly úspěšně zapojeny a realizovány všechny čtyři obvody RC oscilátorů. Jako laboratorní zdroj byl použit stabilizovaný zdroj napětí/proudu Statron typ 2229 (obrázek 4.1), který byl použit pro napájení obvodu. Jako osciloskop byl použit Tektronix TDS 1002B (obrázek 4.2), dále byly použity odpory, kondenzátory a operační zesilovač z laboratorní stavebnice RC Didactic Systems (obrázek 4.3).



Obrázek 4.1: Laboratorní zdroj



Obrázek 4.2: Osciloskop Tektronix TDS 1002B

Obrázek 4.3: *Stavebnice RC Didactic Systems*

Hodnoty pasivních prvků jsem dosadil pomocí uvedených výpočtů a vztahů v kapitole 3. Napájení obvodu je realizováno přes modul OPERATIONAL AMPLIFIER, kde vnější napájení modulu U_{CC} je stejnosměrný proud 5 V, dodávaný laboratorním zdrojem, a vnitřní napájení operačního zesilovače z vestavěného měniče napětí +5 V je ± 15 V. K propojení jednotlivých prvků jsem použil vodiče dostupné v laboratoři. Na výstup obvodu je připojen osciloskop, který zaznamená průběh signálu a uloží jej na USB flash disk.

4.1 Wienův můstek

Schéma zapojení obvodu je znázorněno na obrázku 3.1 v kapitole 3.

Tabulka 4.1: *Hodnoty pasivních prvků*

R1	R2	R3	R4	C1	C2
10 k Ω	10 k Ω	14 k Ω	7 k Ω	3 nF	3 nF

Po zapojení obvodu byla provedena úprava zesílení napětí A_V operačního zesilovače, kde bylo potřeba zvětšit zesílení, z důvodu dotvarování sinusového průběhu signálu, odporem R3, který má nyní hodnotu 14,12 k Ω . Dotvarování bylo provedeno přímým sledováním průběhu signálu na osciloskopu. Zesílení napětí A_V je nyní:

$$A_V = 1 + \left(\frac{R_3}{R_4} \right) = 1 + \left(\frac{14,12}{7} \right) = 3,017. \quad (4.1)$$

Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v části nazvané Příloha A: Tabulka A.1.

Výběrový průměr \bar{f} z naměřených hodnot frekvence f_i se určí ze vztahu:

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n} = \frac{52,55192}{10} = 5\,255,19 \text{ Hz}, \quad (4.2)$$

a standardní nejistota u_{Af} ze vztahu:

$$u_{Af} = s_{\bar{f}} = \frac{s_f}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta f_i^2} = \sqrt{\frac{5,6 \cdot 10^{-10}}{10 \cdot 9}} = 2,49 \cdot 10^{-6} \text{ kHz}. \quad (4.3)$$

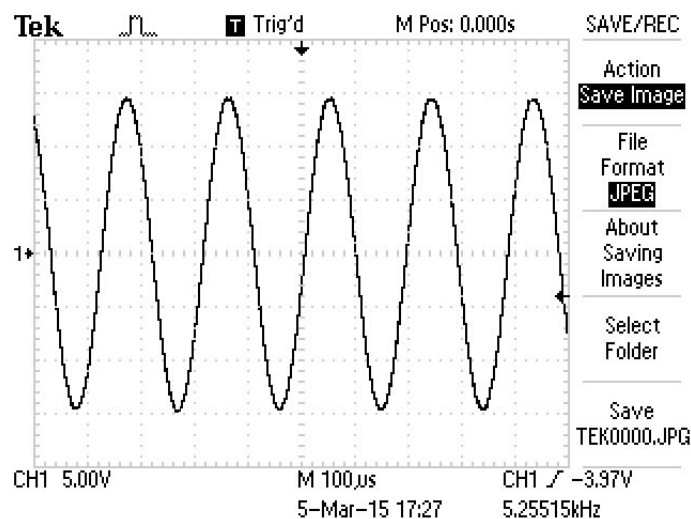
Rozšířená standardní nejistota U se vypočte ze vztahu:

$$U = k_u \cdot u_{Af} = 2 \cdot 2,49 \cdot 10^{-6} = 4,98 \cdot 10^{-6} \text{ kHz}, \quad (4.4)$$

přičemž je doporučováno $k_u = 2$ pro konfidenční úroveň 95 %.

$$f_0 = (5\,255,19 \pm 0,01) \text{ Hz, pro } k_u = 2 \quad (4.5)$$

Na výstupu oscilátoru byl zaznamenán sinusový průběh signálu, který je zachycen na obrázku 4.1. Naměřená frekvence je 5 255,19 Hz, dle rovnice 4.2.



Obrázek 4.1: Průběh signálu na výstupu osciloskopu

Relativní odchylka simulované frekvence δ_{f_s} se vypočte ze vztahu:

$$\delta_{f_s} = \left| \frac{f_v - f_s}{f_v} \right| \cdot 100 = \left| \frac{5,31 - 5,24}{5,31} \right| \cdot 100 = \left| \frac{0,07}{5,31} \right| \cdot 100 = 1,32 \%. \quad (4.6)$$

Relativní odchylka odměřené frekvence δ_{f_o} se vypočte ze vztahu:

$$\delta_{f_o} = \left| \frac{f_v - f_o}{f_v} \right| \cdot 100 = \left| \frac{5,31 - 5,255}{5,31} \right| \cdot 100 = \left| \frac{0,055}{5,31} \right| \cdot 100 = 1,04 \%. \quad (4.7)$$

Tabulka 4.2: Porovnání získaných frekvencí

Frekvence [kHz]		
Vypočítaná	Simulovaná	Odměřená
5,31	5,24	5,255

Tabulka 4.3: *Odchylky od vypočtené frekvence*

Frekvence	Odchylka [%]
Simulovaná	1,32
Odměřená	1,04

Z tabulek 4.2 a 4.3 je zřejmé, že odchylky získaných frekvencí jsou pouze nepatrné. Můžeme říci, že oscilátor byl úspěšně sestaven a kmitá na požadované frekvenci, které jsme chtěli návrhem dosáhnout. Odchylky frekvencí mohou být způsobeny použitými operačními zesilovači.

4.2 Dvojitý T-článek

Schéma zapojení obvodu je znázorněno na obrázku 3.3 v kapitole 3.

Tabulka 4.4: *Hodnoty pasivních prvků*

R1	R2	R3	R4	R5	C1	C2	C3
10 kΩ	10 kΩ	5 kΩ	14 kΩ	7 kΩ	6 nF	3 nF	3 nF

Po zapojení obvodu byla provedena úprava zesílení napětí A_V operačního zesilovače, kde bylo potřeba zvětšit zesílení, z důvodu dotvarování sinusového průběhu signálu, odporem R4, který má nyní hodnotu 800 kΩ. Dotvarování bylo provedeno přímým sledováním průběhu signálu na osciloskopu. Zesílení napětí A_V je nyní:

$$A_V = 1 + \left(\frac{R_4}{R_5}\right) = 1 + \left(\frac{800}{7}\right) = 114,286. \quad (4.8)$$

Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v části Příloha A: Tabulka A.2.

Výběrový průměr \bar{f} z naměřených hodnot frekvence f_i se určí ze vztahu:

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n} = \frac{52,89884}{10} = 5\,289,88 \text{ Hz}. \quad (4.9)$$

Standardní nejistota u_{Af} je charakterizována vztahem:

$$u_{Af} = s_{\bar{f}} = \frac{s_f}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta f_i^2} = \sqrt{\frac{6,44 \cdot 10^{-9}}{10 \cdot 9}} = 8,46 \cdot 10^{-6} \text{ kHz}. \quad (4.10)$$

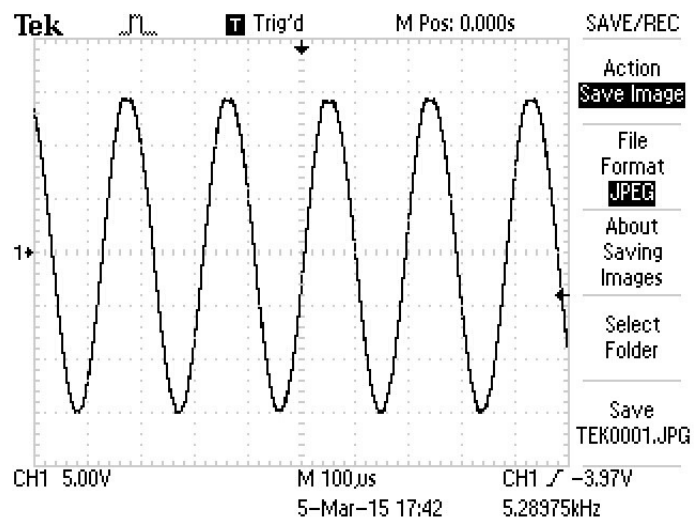
Rozšířená standardní nejistota U se vypočte ze vztahu:

$$U = k_u \cdot u_{Af} = 2 \cdot 8,46 \cdot 10^{-6} = 16,92 \cdot 10^{-6} \text{ kHz}, \quad (4.11)$$

přičemž je doporučováno $k_u = 2$ pro konfidenční úroveň 95 %.

$$f_0 = (5\,289,88 \pm 0,02) \text{ Hz}, \text{ pro } k_u = 2 \quad (4.12)$$

Na výstupu oscilátoru byl zaznamenán sinusový průběh signálu, který je zachycen na obrázku 4.2. Naměřená frekvence je 5 289,88 Hz, dle rovnice 4.9.



Obrázek 4.2: Průběh signálu na výstupu osciloskopu

Relativní odchylka simulované frekvence δ_{f_s} se vypočte ze vztahu:

$$\delta_{f_s} = \left| \frac{f_v - f_s}{f_v} \right| \cdot 100 = \left| \frac{5,31 - 5,55}{5,31} \right| \cdot 100 = \left| \frac{-0,24}{5,31} \right| \cdot 100 = 4,52 \%. \quad (4.13)$$

Relativní odchylka odměřené frekvence δ_{f_o} se vypočte ze vztahu:

$$\delta_{f_o} = \left| \frac{f_v - f_o}{f_v} \right| \cdot 100 = \left| \frac{5,31 - 5,289}{5,31} \right| \cdot 100 = \left| \frac{0,021}{5,31} \right| \cdot 100 = 0,4 \%. \quad (4.14)$$

Tabulka 4.5: Porovnání získaných frekvencí

Frekvence [kHz]		
Vypočítaná	Simulovaná	Odměřená
5,31	5,55	5,289

Tabulka 4.6: Odchylky od vypočtené frekvence

Frekvence	Odchylka [%]
Simulovaná	4,52
Odměřená	0,4

Z tabulek 4.5 a 4.6 je patrné, že odchylky získaných frekvencí jsou malé. Jednoznačně lze konstatovat, že oscilátor byl úspěšně sestaven a kmitá na požadované frekvenci, které jsme chtěli návrhem dosáhnout. Odchylky frekvencí mohou být způsobeny použitými operačními zesilovači.

4.3 RC oscilátor s horní propustí

Schéma zapojení obvodu je znázorněno na obrázku 3.5 v kapitole 3.

Tabulka 4.7: *Hodnoty pasivních prvků*

R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3
10 kΩ	10 kΩ	10 kΩ	290 kΩ	3 nF	3 nF	3 nF

Po zapojení obvodu byla provedena úprava zesílení napětí A_V operačního zesilovače. Kvůli dotvarování sinusového průběhu signálu bylo nutno zmenšit zesílení odporem R4, který má nyní hodnotu 143 kΩ. Dotvarování bylo provedeno přímým sledováním průběhu signálu na osciloskopu. Zesílení napětí A_V je nyní:

$$A_V = \frac{R_4}{R} = \frac{143}{10} = 14,3. \quad (4.15)$$

Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v části Příloha A: Tabulka A.3.

Výběrový průměr \bar{f} z naměřených hodnot frekvence f_i se určí ze vztahu:

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n} = \frac{28,14252}{10} = 2\,814,25 \text{ Hz}, \quad (4.16)$$

a standardní nejistota u_{Af} ze vztahu:

$$u_{Af} = s_{\bar{f}} = \frac{s_f}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta f_i^2} = \sqrt{\frac{15,6 \cdot 10^{-10}}{10 \cdot 9}} = 4,16 \cdot 10^{-6} \text{ kHz}. \quad (4.17)$$

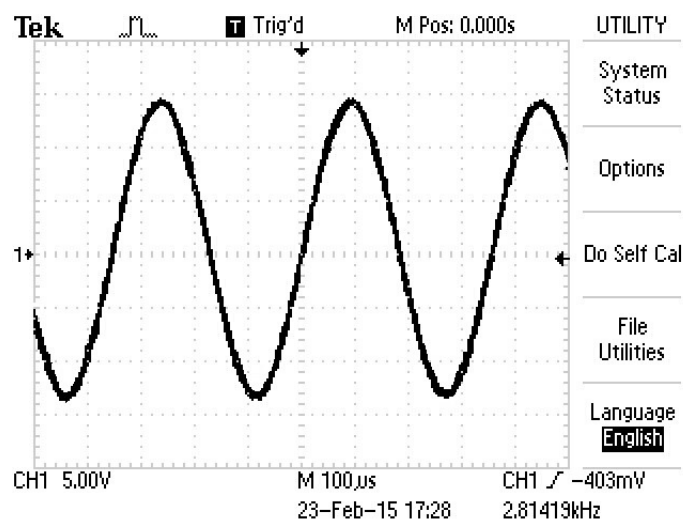
Rozšířená standardní nejistota U se vypočte ze vztahu:

$$U = k_u \cdot u_{Af} = 2 \cdot 4,16 \cdot 10^{-6} = 8,32 \cdot 10^{-6} \text{ kHz}, \quad (4.18)$$

přičemž je doporučováno $k_u = 2$ pro konfidenční úroveň 95 %.

$$f_0 = (2\,814,25 \pm 0,01) \text{ Hz, pro } k_u = 2 \quad (4.19)$$

Na výstupu oscilátoru byl zaznamenán sinusový průběh signálu, který je zachycen na obrázku 4.3. Naměřená frekvence je 2 814,25 Hz, dle rovnice 4.16.



Obrázek 4.3: Průběh signálu na výstupu oscilátoru

Relativní odchylka simulované frekvence δ_{f_s} se vypočte ze vztahu:

$$\delta_{f_s} = \left| \frac{f_v - f_s}{f_v} \right| \cdot 100 = \left| \frac{2,17 - 2,39}{2,17} \right| \cdot 100 = \left| \frac{-0,22}{2,17} \right| \cdot 100 = 10,14 \%. \quad (4.20)$$

Relativní odchylka odměřené frekvence δ_{f_o} se vypočte ze vztahu:

$$\delta_{f_o} = \left| \frac{f_v - f_o}{f_v} \right| \cdot 100 = \left| \frac{2,17 - 2,814}{2,17} \right| \cdot 100 = \left| \frac{-0,644}{2,17} \right| \cdot 100 = 29,68 \%. \quad (4.21)$$

Tabulka 4.8: Porovnání získaných frekvencí

Frekvence [kHz]		
Vypočítaná	Simulovaná	Odměřená
2,17	2,39	2,814

Tabulka 4.9: Odchylky od vypočtené frekvence

Frekvence	Odchylka [%]
Simulovaná	10,14
Odměřená	29,68

Z tabulek 4.8 a 4.9 je patrné, že odchylky získaných frekvencí již rostou znatelněji, oscilátor byl úspěšně sestaven, ovšem kmitá na mnohem vyšší frekvenci, než která byla vypočítána. Odchylky frekvencí mohou být způsobeny úpravou zesílení, či použitým operačním zesilovačem.

4.4 RC oscilátor s dolní propustí

Schéma zapojení obvodu je znázorněno na obrázku 3.7 v kapitole 3.

Tabulka 4.10: *Hodnoty pasivních prvků*

R1	R2	R3	R4	R5	C1	C2	C3
10 kΩ	10 kΩ	10 kΩ	10 kΩ	560 kΩ	10 nF	10 nF	10 nF

Po zapojení obvodu byla provedena úprava zesílení napětí A_V operačního zesilovače, kde bylo potřeba zmenšit zesílení, z důvodu dotvarování sinusového průběhu signálu, odporem R5, který má nyní hodnotu 390 kΩ. Dotvarování bylo provedeno přímým sledováním průběhu signálu na osciloskopu. Zesílení napětí A_V je nyní:

$$A_V = \frac{R5}{R} = \frac{390}{10} = 39. \quad (4.22)$$

Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v části Příloha A: Tabulka A.4.

Výběrový průměr \bar{f} z naměřených hodnot frekvence f_i se určí ze vztahu:

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n} = \frac{41,00732}{10} = 4\,100,73\,Hz \quad (4.23)$$

a standardní nejistota u_{Af} ze vztahu:

$$u_{Af} = s_{\bar{f}} = \frac{s_f}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta f_i^2} = \sqrt{\frac{23,76 \cdot 10^{-9}}{10 \cdot 9}} = 16,25 \cdot 10^{-6}\,kHz. \quad (4.24)$$

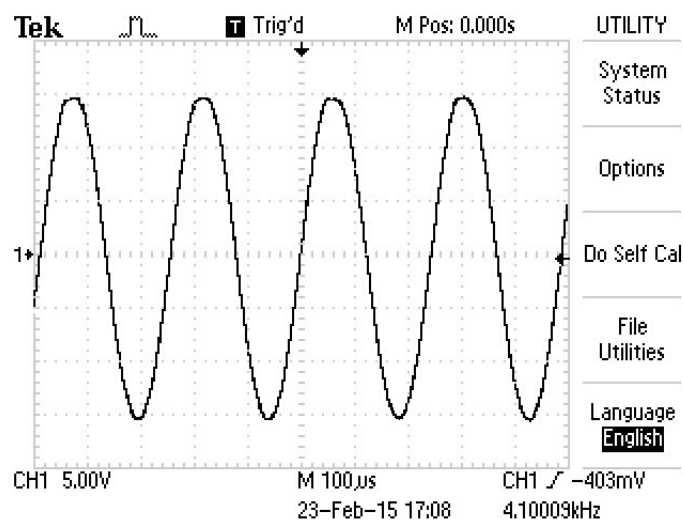
Rozšířená standardní nejistota U se vypočte ze vztahu:

$$U = k_u \cdot u_{Af} = 2 \cdot 16,25 \cdot 10^{-6} = 32,5 \cdot 10^{-6}\,kHz, \quad (4.25)$$

přičemž je doporučováno $k_u = 2$ pro konfidenční úroveň 95 %.

$$f_0 = (4\,100,73 \pm 0,03)\,Hz, \text{ pro } k_u = 2 \quad (4.26)$$

Na výstupu oscilátoru byl zaznamenán sinusový průběh signálu, zachycen na obrázku 4.4. Naměřená frekvence je 4 100,73 Hz, dle rovnice 4.23.



Obrázek 4.4: Průběh signálu na výstupu osciloskopu

Relativní odchylka simulované frekvence δ_{f_s} se vypočte ze vztahu:

$$\delta_{f_s} = \left| \frac{f_v - f_s}{f_v} \right| \cdot 100 = \left| \frac{5 - 4,97}{5} \right| \cdot 100 = \left| \frac{0,03}{5} \right| \cdot 100 = 0,6 \%. \quad (4.27)$$

Relativní odchylka odměřené frekvence δ_{f_o} se vypočte ze vztahu:

$$\delta_{f_o} = \left| \frac{f_v - f_o}{f_v} \right| \cdot 100 = \left| \frac{5 - 4,1}{5} \right| \cdot 100 = \left| \frac{0,9}{5} \right| \cdot 100 = 18 \%. \quad (4.28)$$

Tabulka 4.11: Porovnání získaných frekvencí

Frekvence [kHz]		
Vypočítaná	Simulovaná	Odměřená
5	4,97	4,1

Tabulka 4.12: Odchylky od vypočtené frekvence

Frekvence	Odchylka [%]
Simulovaná	0,6
Odměřená	18

Z tabulek 4.11 a 4.12 je patrné, že vypočtená a simulovaná frekvence má minimální odchylku, ovšem naměřená frekvence má výrazně menší frekvenci, což může být způsobeno úpravou zesílení, či použitým operačním zesilovačem. Ovšem i zde byl oscilátor úspěšně sestaven a generuje sinusový signál, avšak s mnohem menší frekvencí, než která byla vypočtena.

Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo navrhnout všechny základní typy RC oscilátorů. Prostudováním teorie oscilátorů jsem porozuměl jejich principu a v práci jsem uvedl jejich obecný popis a základní rozdělení. V další části jsem vysvětlil vlastnosti oscilátorů a podmínky vzniku oscilací. Navrhl jsem čtyři různá zapojení RC oscilátorů, přičemž jsem vycházel z teorie dostupné v literatuře i na odborných webových stránkách. U navržených zapojení jsem vypočítal základní potřebné veličiny a pomocí počítače jsem v programu NI Multisim ověřil splnění oscilačních podmínek a rozkmitání obvodu. Výstupem z programu byl průběh signálu na osciloskopu. Dále jsem ověřil simulaci reálným měřením v laboratoři mikropočítačové techniky EB212 v budově FEI VŠB, kde jsem realizoval všechny čtyři obvody RC oscilátorů. Dle mého předpokladu se mi úspěšně podařilo vygenerovat sinusový signál u všech obvodů. Každé měření jsem realizoval 10x, a to opisem velikosti frekvence. Změřené hodnoty byly uloženy přes osciloskop na USB flash disk. Poté jsem naměřené hodnoty zpracoval a vypočetl chybu měření a odchylku. U všech měření jsem vytvořil graf znázorňující porovnání vypočtené, simulované a změřené frekvence. Zapojení obvodů se chovalo dle teoretických předpokladů, avšak někdy s patrným rozdílem generované frekvence.

Tato práce by dále mohla být rozvinuta v podobě využití některého zapojení RC oscilátorů v návrhu a sestavení reálně užitečného obvodu či přístroje, například jako rušička FM rádia.

Použitá literatura

- [1] Oscillators: An introductory blog post. Electronic Circuits and Diagram-Electronics Projects and Design [online]. [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://www.circuitstoday.com/oscillators-an-introductory-blog-post>
- [2] BEZDĚK, Miloslav. Elektronika. 1. vyd. České Budějovice: Kopp, 2002, 271 s. ISBN 8072321714.
- [3] ŽALUD, Václav. Moderní radioelektronika. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2000, 653 s. ISBN 80-86056-47-3.
- [4] TIETZE, Ulrich, Christoph SCHENK a Eberhard SCHMID. Electronic circuits: design and applications. 1. vyd. Německo: Springer-Verlag, 1991, 928 s. ISBN 0-387-50608-X.
- [5] VACHALA, Vladimír. Oscilátory a generátory. Editor Luděk Kříšťan. Praha: SNTL, 1974, 242 s.
- [6] ROSENSTEIN, Milton a Paul MORRIS. Modern electronic devices: circuit design and application. 2. vyd. Reston: Reston Publishing Company, 1985, 501 s. ISBN 0-8359-4548-0.
- [7] BRANDŠTETTER, Pavel. Elektronika. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1999, 313 s. ISBN 80-7078-966-2.
- [8] VRBA, Kamil a Kamil VRBA ML. Technika analogových obvodů a systémů: Sbírka příkladů. 3. vyd. Brno: VUT, 1989, 225 s. ISBN 80-214-1060-4.
- [9] The Wien Bridge Oscillator. Electronics Tutorials [online]. [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: http://www.electronics-tutorials.ws/oscillator/wien_bridge.html
- [10] Oscillator with op amps. In: Electronics Forum (Circuits, Projects and Microcontrollers) [online]. 2014 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://www.electro-tech-online.com/threads/oscillator-with-op-amps.140520/>
- [11] The RC Oscillator Circuit. Electronic Tutorials [online]. [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: http://www.electronics-tutorials.ws/oscillator/rc_oscillator.html

Seznam příloh

Příloha A:	Naměřené hodnoty obvodů	I
------------	-------------------------------	---

Příloha A: *Naměřené hodnoty obvodů*

Tabulka A.1: *Naměřené výstupní frekvence oscilátoru s Wienovým můstkem*

počet	f [kHz]	Δf_i [kHz] $\cdot 10^{-6}$	Δf_i^2 [kHz ²] $\cdot 10^{-10}$
1	5,2552	8	0,64
2	5,25518	-12	1,44
3	5,25519	-2	0,04
4	5,2552	8	0,64
5	5,25519	-2	0,04
6	5,25519	-2	0,04
7	5,2552	8	0,64
8	5,25518	-12	1,44
9	5,25519	-2	0, 04
10	5,2552	8	0,64
n=10	$\Sigma=52,55192$	$\Sigma=0$	$\Sigma=5,6$

Tabulka A.2: *Naměřené výstupní frekvence oscilátoru s dvojitým T-článkem*

počet	f [kHz]	Δf_i [kHz] $\cdot 10^{-6}$	Δf_i^2 [kHz ²] $\cdot 10^{-9}$
1	5,28988	-4	0,016
2	5,28991	26	0,676
3	5,28985	-34	1,156
4	5,28986	-24	0,576
5	5,28989	6	0,036
6	5,28988	-4	0,016
7	5,28993	46	2,116
8	5,28988	-4	0,016
9	5,28991	26	0,676
10	5,28985	-34	1,156
n=10	$\Sigma=52,89884$	$\Sigma=0$	$\Sigma=6,44$

Tabulka A.3: *Naměřené výstupní frekvence oscilátoru s horní propustí*

počet	f [kHz]	Δf_i [kHz] $\cdot 10^{-6}$	Δf_i^2 [kHz ²] $\cdot 10^{-10}$
1	2,81423	-22	4,84
2	2,81425	-2	0,04
3	2,81425	-2	0,04
4	2,81428	28	7,84
5	2,81426	8	0,64
6	2,81425	-2	0,04
7	2,81424	-12	1,44
8	2,81425	-2	0,04
9	2,81426	8	0,64
10	2,81425	-2	0,04
n=10	$\Sigma=28,14252$	$\Sigma=0$	$\Sigma=15,6$

Tabulka A.4: *Naměřené výstupní frekvence oscilátoru s dolní propustí*

počet	f [kHz]	Δf_i [kHz] $\cdot 10^{-6}$	Δf_i^2 [kHz ²] $\cdot 10^{-9}$
1	4,10067	-62	3,844
2	4,10068	-52	2,704
3	4,10073	-2	0, 004
4	4,1008	68	4,624
5	4,10076	28	0, 784
6	4,10082	88	7,744
7	4,10074	8	0,064
8	4,10072	-12	0,144
9	4,10073	-2	0,004
10	4,10067	-62	3,844
n=10	$\Sigma=41,00732$	$\Sigma=0$	$\Sigma=23,76$